

室内回流式温度成層風洞の基本性能及び 夏季晴天時の公園緑地の熱環境シミュレーション

大場 正昭^{*1} 栗田 剛^{*2} 名和 健太郎^{*3}

A Performance of Thermally Stratified Closed-type Wind Tunnel and Simulation of Thermal Environment in Parks and Green Belts in Summer

Masaaki Ohba^{*1} Tsuyosi Kurita^{*2} Kentarho Nawa^{*3}

A new wind tunnel has been designed to study the effects of thermal stratification on flow and diffusion in an urban area. Its operating performance was much better than that of previous systems due to newly designed temperature control systems composed of a re-heater and floor heating panels. The wind tunnel could create temperature gradients as strong as a bulk Richardson number equivalent to 0.57 and maintained stable layers in the test section. The thermal boundary layer in summer was developed by using the heating panels. The cooling panel with cold water simulated the cool surface zone in parks and green belts. When the cooling panel was set to the leeward of the heating panel, a large cooled air region was generated on the cooling panel. It is expected that by simulating nocturnal cold air drainages occurred by the surface temperatures differences between parks and built-up areas, appropriate methods could be developed to keep the urban climate more comfortable in summer.

1. 序

大都市では建物の高層・高密度による風速の弱体化、エネルギー消費の増大による廃熱と排ガス量の増大、地表面被覆の改変により都市大気汚染化と高温化が進行している。都市大気を構成するキャノピー層は、アスファルトやコンクリート表面からの発熱、空調や自動車からの人口排熱等により、深刻な熱汚染が生じ、都市アメニティの低下が大きな社会問題になっている。この中で、熱汚染対策として、公園緑地や河川等のような都市内に存在する自然の冷温帯からの冷気流を速やかに市街地に導入し、暑熱環境の緩和、熱汚染の防除を図る手法が検討されている。この手法を有効に活用するためには、周辺の気流分布を理解し、大気の流れ・拡散メカニズムを適切に利用する必要がある。

都市の温熱空気環境をシミュレーションする目的で温度成層風洞を本学工学部建築学科に建設した。都市温熱研究の初期段階として、温度成層風洞による夏季晴天時の公園緑地の熱環境シミュレーションを試みた。温度成層風洞の基本性能と合わせて、公園緑地の熱環境シミュレーションについて報告する。

2. 温度成層風洞の概要

(1) 風洞

図1に温度成層風洞の概観を、図2に風洞配置図を示す[1-4]。風洞は吹出し式エッフェル型で、気流の冷加熱部は温度成層装置、床パネル加熱冷却装置及び戻り気流冷却装置で構成される。送風機は直流5.5kWの両吸い込み型シロッコファンである。測定胴は幅1.2m×長さ9.37m×高さ1.0mで、最小風速は0.2m/sである。温度成層装置は縮流胴と測定胴の間に配置され、気流温度を調整する。床面温度は6面の加熱冷却パネルで制御される。観測窓を測定胴の側壁面に数ヶ所設けて、レーザー風速計で床面近傍まで風速測定できるように設計した。風洞内の3次元トラバース装置の移動範囲は $6000\text{mm} \leq X \leq 6900\text{mm}$ 、 $-500\text{mm} \leq Y \leq 500\text{mm}$ 、 $Z \leq 600\text{mm}$ である。

(2) 熱源

^{*1} 東京工芸大学工学部建築学科教授 ^{*2} 株式会社 風技術センター

^{*3} 東京工芸大学大学院工学研究科建築学専攻

2001年9月10日 受理

図3に熱源システムの配管系統図を示す。3台の空冷式チラーユニットで温水と冷水を製造した。チラー1台あたりの冷却能力は17kW、加熱能力は26.3kWである。6℃の冷水と60℃の温水を同時に供給する。製造された冷水と温水は容量3.0m³の1次タンクに貯められた後に2次ポンプにより各系統に送水される。チラーユニットの温度制御はON-OFF自動制御方式である。当初、ON-OFF自動制御方式は温水・冷水の温度変動を生じさせたので、温水タンクと温度成層装置の間に温水再加熱装置を設置し、温水の温度変動を抑制した。温水再加熱装置は加熱能力15kWの流水型電気ヒーターでサイリスタで制御した。温度上昇値は315L/min時に0.7℃が得られた。

(3) 温度成層装置

図4に温度成層装置を示す。温度成層装置は25段の温水コイルで構成され、各段のコイルは4列である。1段あたりの加熱能力は3.5kWであり、温度設定範囲は10～50℃である。温度制御は、三方弁(モーターバルブ)をPID制御して温水流量を調節した。モーターバルブは少流量時の制御精度が低いので、任意の開度にバルブを固定できる機能を付加した。

(4) 床パネル加熱冷却装置

図5に床パネルの断面図を示す。床パネルは1.2m×1.2mの大きさで、測定胴のX=50mmから下流側へ6枚敷き詰めた。パネルは冷却コイルの上に電気ヒーターと厚さ10mmのアルミパネルを敷いた。冷却コイルは主流直角方向に多数の溝を設け、冷水が流れるように配管した。冷却コイルの冷却能力は2.08kW/m²で、温度設定範囲は8～25℃である。温度制御は三方弁のPID制御方式によった。加熱ヒーターは加熱能力1.04kW/m²の面状ヒーターで、80℃まで加熱できる。

(5) 戻り気流冷却装置

戻り気流冷却装置は4台の冷水コイルで構成される。コイル1台あたりの冷却能力は21.8kWで、温度設定範囲は8～25℃である。

3. 風洞の基本性能検査

3.1 実験概要

3.1.1 実験条件

表1に実験条件を示す。ケース1は中立流れて、温度成層装置で気流を50℃一様加熱し、床面温度は

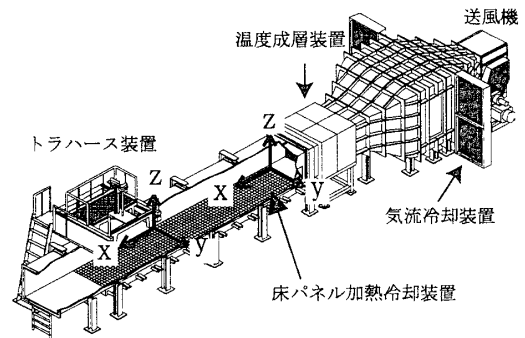


図1 温度成層風洞概観

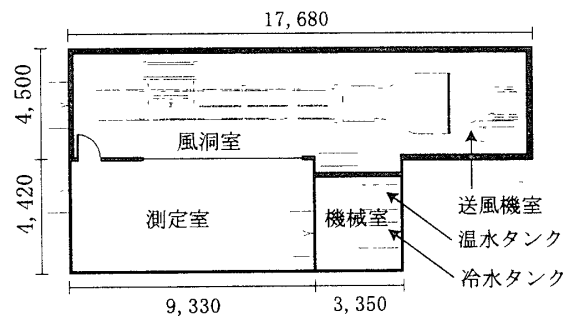


図2 風洞配置図

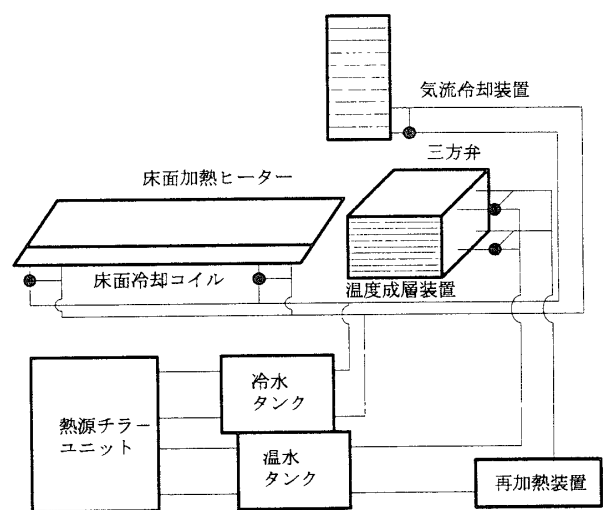


図3 熱源の配管系統図

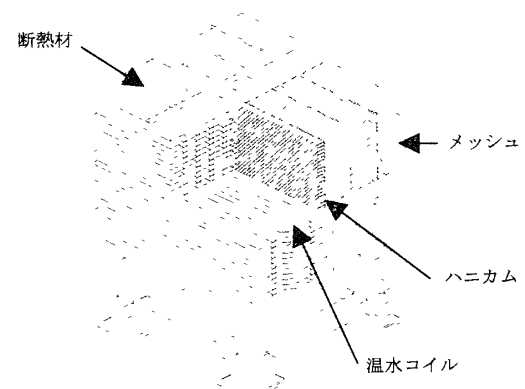


図4 温度成層装置

床面パネルを加熱して気流温度と一致させた。ケース 2 は一様加熱と床面冷却からなる安定流れ、ケース 3 は勾配加熱と床面冷却による安定流れである。実験時の風速は 1m/s に設定した。大気安定度は (1) 式に示すバルクリチャードソン数で定義し、 $Z=0 \sim 700\text{mm}$ の間で算出した。

$$Rb = gH \frac{T_h - T_o}{T_m} \frac{1}{U h^2} \quad (1)$$

T_h : $Z=h$ の温度、 T_o : 床面温度、 T_m : 平均温度、
 U : $Z=h$ の風速、 H : 代表高さ、 g : 重力加速度

宇野らの都市における冬季の観測では 40m ~ 200m の高さで局所バルクリチャードソン数が 0.2 ~ 0.5 の数値が測定されており [5]、ケース 3 は都市冬季の成層条件を模擬している。

3.1.2 測定方法

(1) 温度分布

風洞内温度分布は銅—コンスタンタン型熱電対 (線径 0.2mm) を用いて測定した。測定点数は X 断面で 132 点、Y 断面で 216 点である。測定は、鉛直方向に並べた熱電対を天井のレールに取り付けて移動しながら行った。熱電対の測定時間は 1 分間である。

(2) 風速分布

風速分布は 2 次元レーザー流速計 (LDV) を用いて測定した。測定は、測定胴外に設置された移動用架台の 3 次元トラバース装置にレーザー流速計を取り付けて、風洞外から風洞内へ向けてレーザー光を照射して行った。シーディング粒子は平均粒径 1.0 μm で、送風機室のシロッコファンから送入した。測定時間は 1 分で、サンプリング周波数は 250Hz ~ 500Hz である。

(3) 流れの可視化

流れの可視化は、煙発生装置の煙ミストを櫛型ノズルを用いて風洞内に流し、150W のハロゲンランプを照射して行った。櫛型ノズルは直径 1.2 mm のノズルを 20mm 間隔に 10 本並べたもので、ノズルの最下部を風洞床面から 10mm の高さに設置した。

(4) 熱画像

赤外放射温度計 TH3102MR(NEC)を使用した。測定波長域 8 μm ~ 13 μm 、最小検知温度は 0.02°C である。

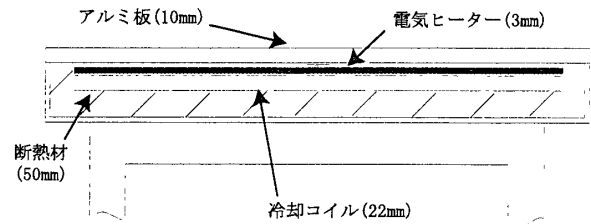


図5 加熱・冷却パネルの断面仕様

表1 風洞の基本性能検査の実験条件

ケース	温度成層装置設定温度	床面設定温度	Rb
1	50°C—様	50°C	0.0
2	50°C—様	9°C	0.52
3	50°C ($Z=975\text{mm}$) ~18°C ($Z=25\text{mm}$)	9°C	0.57

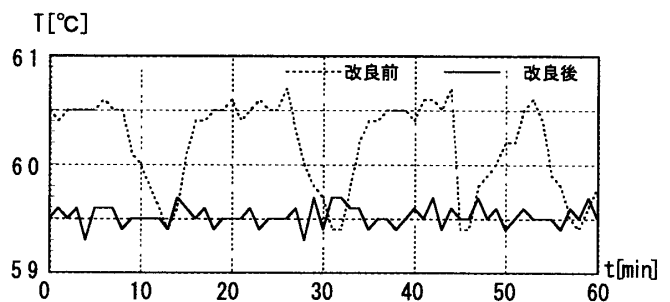


図6 温水タンク温度の時間変化

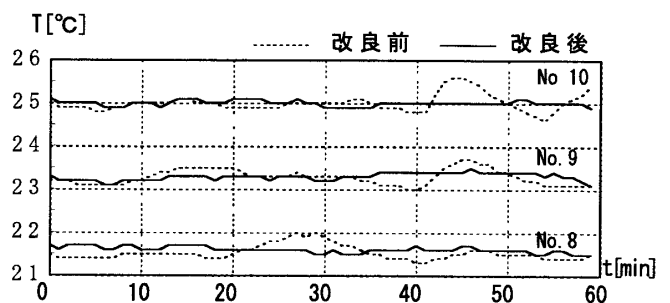


図7 温度成層装置温度の時間変化

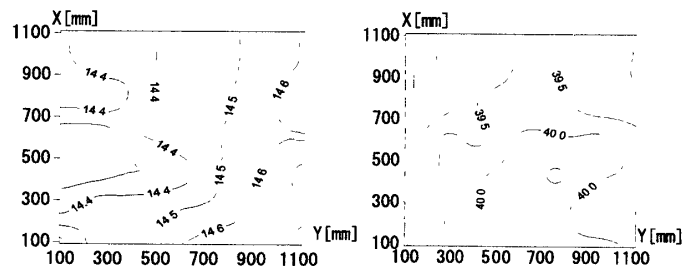
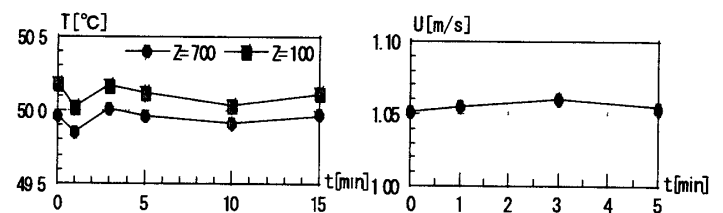


図8 床パネルの表面温度分布



(a) 温度の時間変化

(b) 風速の時間変化

図9 扉開閉に伴う風洞温度と風速の時間変化

3.2 風洞性能および考察

(1) 温度制御装置の特性

図 6 に熱源システム改良工事前後の温水タンクの温度変化を示す。温水再加熱装置の導入により、温水タンクの温度変動は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ から $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ に減少した。

図 7 に改良工事前後の温度成層装置の温度変化を示す。温度成層装置の温度制御は PID 制御で行った。温水再加熱装置の導入により送水温度の変動が抑制されたので温度成層装置の温度変動が減少した。図 8 に測定胴床パネル表面の温度分布を示す。パネル面内の温度差は冷却時で $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、加熱時で $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であった。

(2) 外乱に対する安定性

風洞内の温度、風速を計測する際にセンサーの位置の変更と確認のために、図 2 に示す風洞室の扉を開閉し、測定胴内に実験者が入ることがある。実験者の出入りによる風洞内温度と気流の安定性への影響について調べた。図 9 に結果を示す。温度と風速に大きな擾乱の発生はなく、扉開閉の影響は 5 分経過すれば減少した。

(3) 風洞の温度特性

図 10 に $X=6500\text{mm}$ の Y-Z 断面の温度分布を示す。ケース 1 では風洞内にはほぼ均一な温度分布が形成され、測定胴全体が中立に保たれた。ケース 2 では下層部に温度勾配が形成され、安定流れが $Z \leq 200\text{mm}$ で形成された。ケース 3 では $Z=0 \sim 900\text{mm}$ の範囲で直線的な温度勾配が形成されて、安定な温度成層流が風洞内に再現された。図 11 に熱画像を示す。壁面温度分布と空気温度分布は必ずしも一致しないが、側壁面の温度分布から温度境界層の形成過程を擬似的に観測できた。

(4) 風洞の気流特性

図 13 に測定胴全体の平均温度、平均風速、乱れの強さの分布を示す。平均風速は、何れのケースにおいても平板境界層が発達し、 $X=6500\text{mm}$ で境界層厚さは約 200mm に達した。床面近傍の風速低減はケース 1 とケース 3 に比べてケース 2 が大きかった。原因は、ケース 2 で局所的に強い安定流れが床面近傍で形成されたためである。X 方向の乱れの強さは、 $X=6500\text{mm}$ では全体的にケース 1 に比べてケース 3 の方が小さくなっており、中立より安定の方が乱れが抑制された。ケース 2 で床面近傍の乱れが凸型に分布した。これは、床面付近にある冷たい空気によって乱れが上空へ運搬されたためと考えられる。

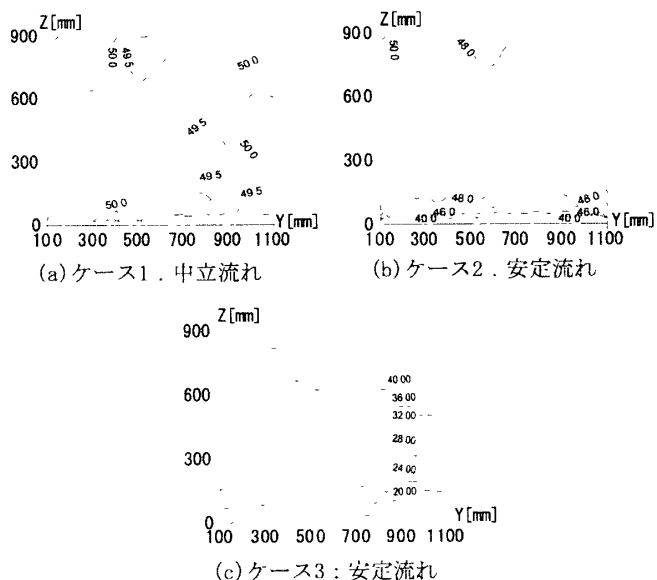


図 10 各成層流の Y-Z 断面温度分布

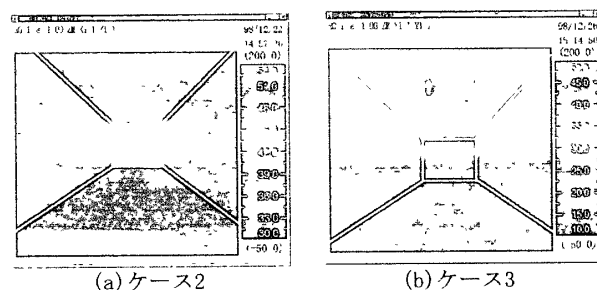


図 11 安定成層流の熱画像

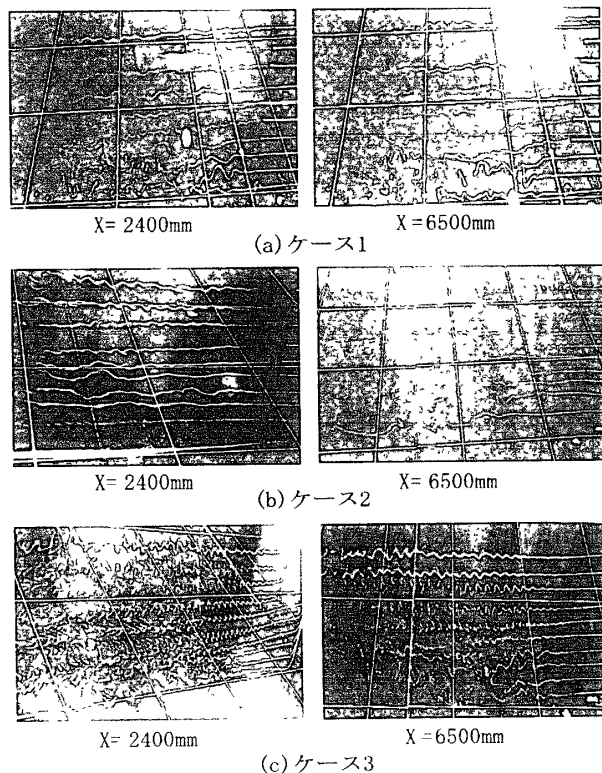


図 12 各成層流の煙軌跡

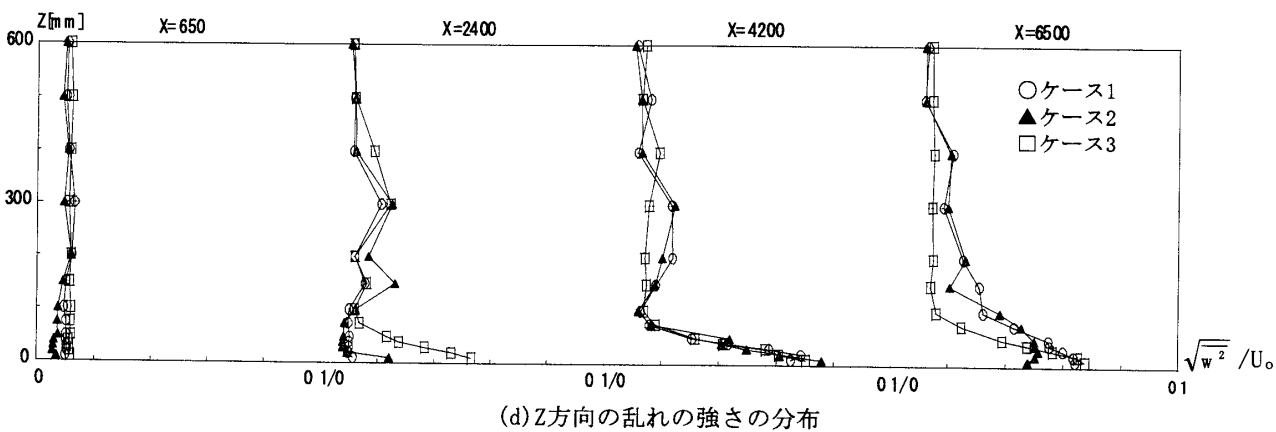
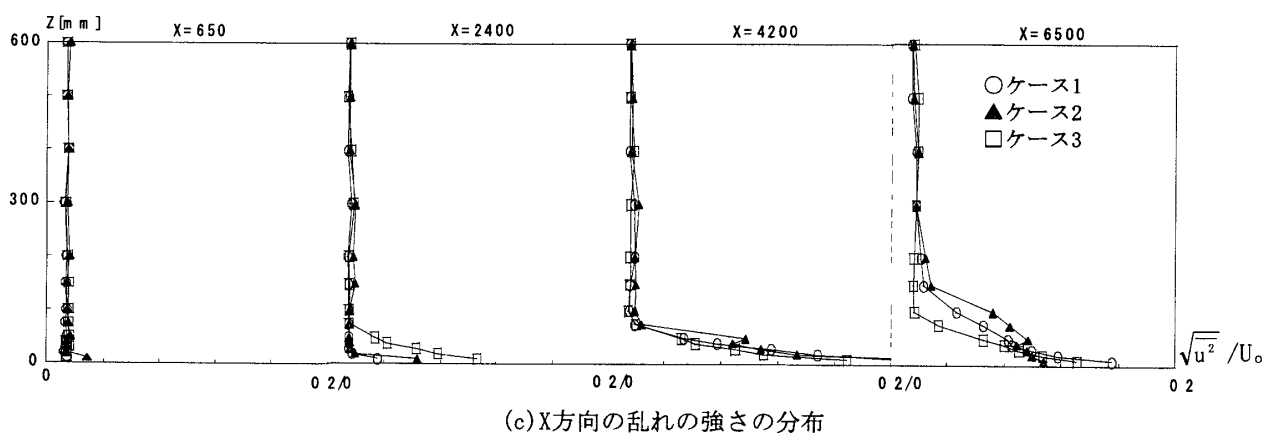
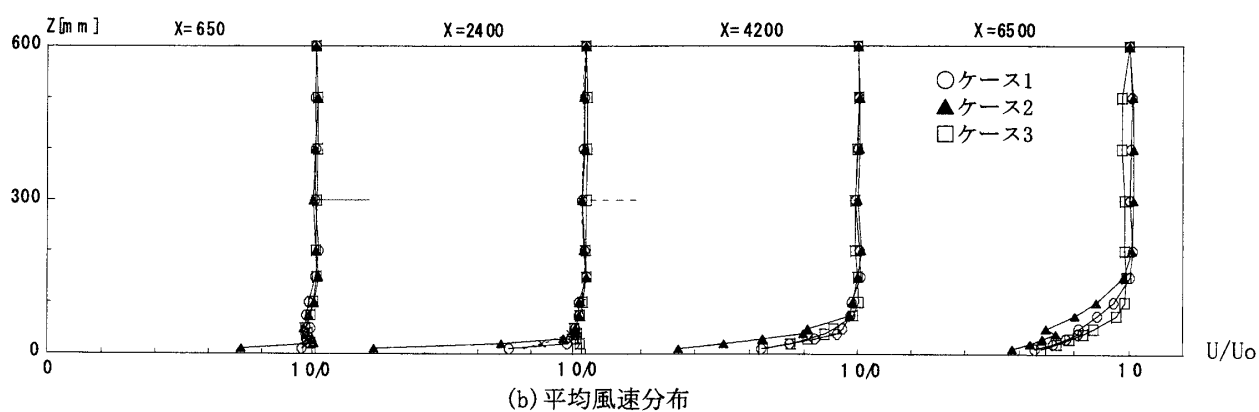
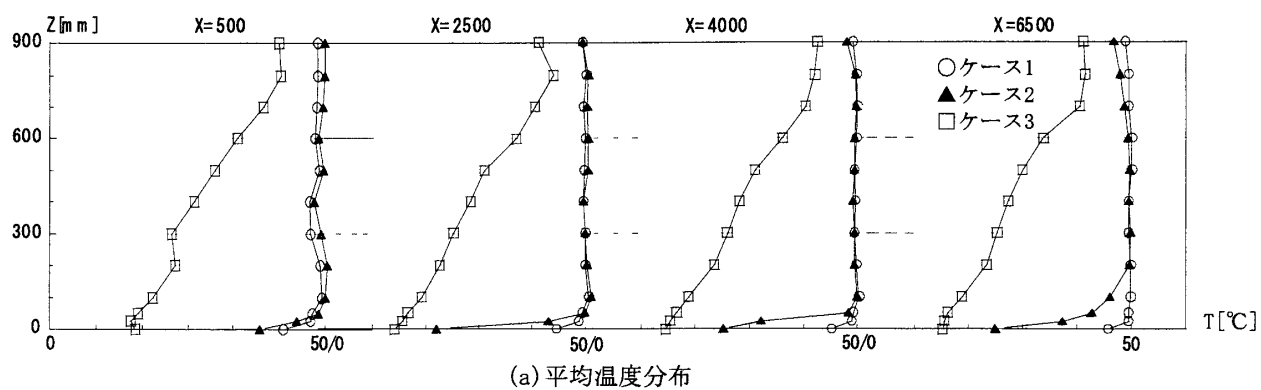


図 13 各成層流の平均温度分布、平均風速分布および乱れの強さの分布の比較

Z 方向の乱れの強さは、 $X=6500\text{mm}$ では全体的にケース 1 に比べてケース 3 の方が小さくなっており、安定流れが乱れを減少させることを確認できた。

(5) 可視化による流れの観測

図 12 に可視化写真を示す。ケース 1 では、 $X=2400\text{mm}$ と 6500mm で下層部の流線変動が大きく乱れが大きいことが判った。ケース 2 では、ケース 1 に比べて全体的に流線の乱れは小さく、安定流れによる乱れの抑制効果を確認できた。ケース 3 では、 $X=2400$ 、 6500mm の何れにおいても巻き波が観測された。大屋 [6] らは安定成層時の Kelvin-Helmholtz 不安定による巻き波の観測を報告しており、今回観察された現象はそれと似た流れの様相を示した。

4. 夏季晴天時の公園緑地の熱環境シミュレーション

4.1 研究目的

冷気は緑地で放射冷却により生成される。夜間の滲み出しによる公園緑地から周辺市街地への冷気流の移流・拡散は、周辺市街地の気温を低減させる効果がある[7]。暑熱環境の緩和、熱汚染の防除を図る手法として、冷熱源としての公園緑地の効果を検討し、都市温暖化を緩和する最適な緑地の配置形態を提案することを目的とする。

4.2 熱環境の相似則

模型実験の相似則について、前田、勝田ら[8-10]は供給熱を Q 、代表風速を U 、代表長さを L 、温度差を θ とおき、縮小率をそれぞれ N_Q 、 N_U 、 N_L 、 N_θ とし、

$$N_Q = N_U N_L^2 N_\theta \quad (2)$$

$$N_\theta = N_U^2 / N_L \quad (3)$$

から

$$N_Q = (N_U)^3 N_L \quad (4)$$

$$\text{ここで } N_Q = (Q)_m / (Q)_p \quad (5)$$

$$N_U = U_m / U_p \quad (6)$$

$$N_L = L_m / L_p \quad (7)$$

を提案した。熱流量は単位面積あたりの通過熱量であり、長さの 2 乗に反比例することから、熱流量 q の縮小率を N_q とし、式 (4) を変形すれば、

$$N_q = (N_U)^3 / N_L \quad (8)$$

$$\text{ここで } N_q = (q)_m / (q)_p \quad (9)$$

の関係をj得る[8.11.12]。

表2 公園緑地の熱環境の実験条件

側 目	実物	風洞
基準風速 U_0	3.0 m/s	0.5 m/s
公園外の発熱量 q_1	150 W/m ²	208 W/m ²
公園内の冷熱量 q_2	-60 W/m ²	-83 W/m ²

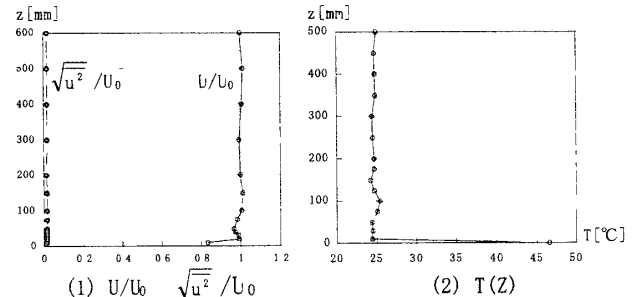


図14 接近流の鉛直風速分布と鉛直温度分布

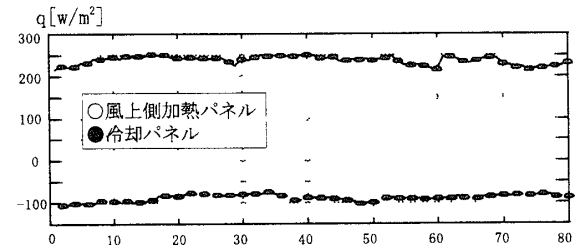


図15 加熱パネルと冷却パネルの放熱流量の経時変化

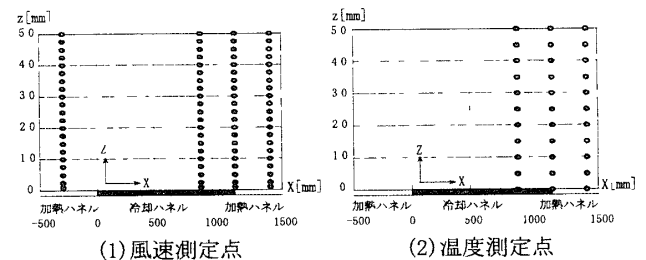


図16 風速と温度の測定点

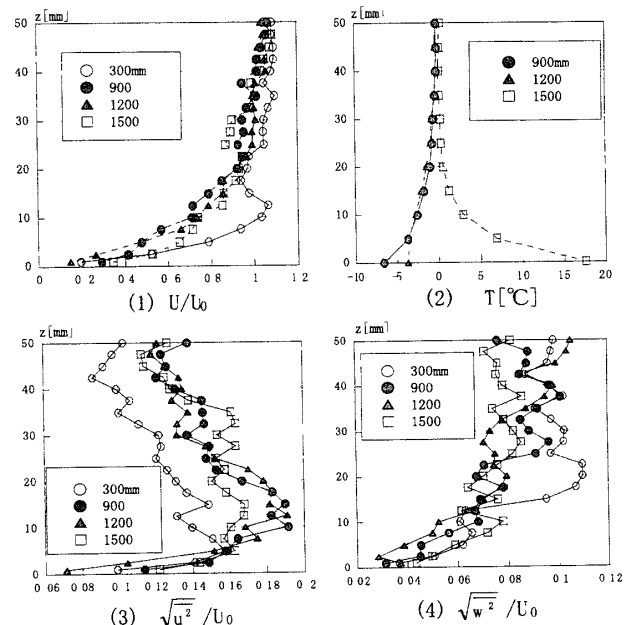


図17 加熱パネルと冷却パネル近傍の気流性状と温度分布

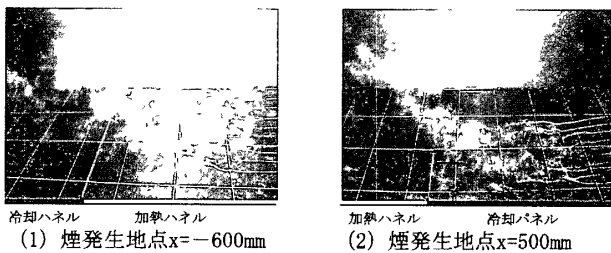


図 18 加熱パネルと冷却パネルの煙軌跡

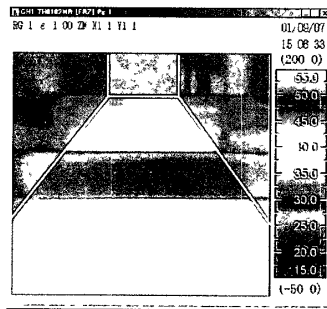


図 19 冷却流の熱画像

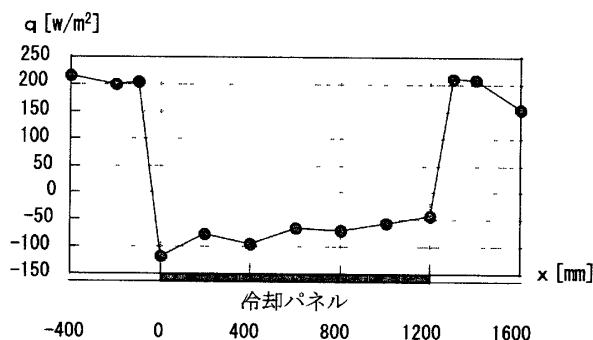


図 20 加熱パネルの放熱流と冷却パネルの冷熱流の分布

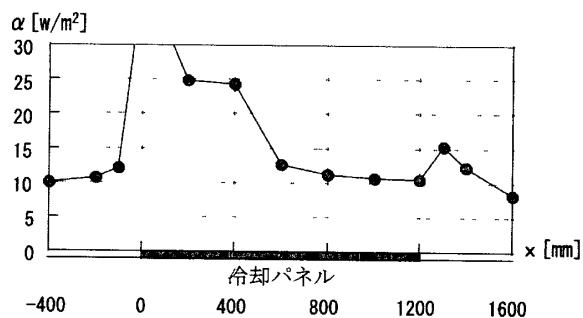


図 21 加熱パネル域と冷却パネル域の局所対流熱伝導率分布

4.3 実験概要

(1) 実験条件

持田は大規模緑地の実測と数値計算から公園内外の発熱流量が公園外 228 W/m^2 、公園内 -25 W/m^2 と報告した[7]。横尾は地方都市の実測から、市街地の顕熱流を $75 \text{ W/m}^2 \sim 130 \text{ W/m}^2$ と報告した[13]。これらを参考にし、実物側の公園緑地の冷熱流量を -60 W/m^2 、公園外の発熱流量を 150 W/m^2 、風速 3 m/s と想定した。風洞パネルの縮尺 $1/300$ 、風速を 0.5 m/s

として、式 (8) から発熱流量と冷熱流量を算出した。表 2 に実験条件を示す。公園緑地の粗度は 0.5 m 以下なので、風洞床面は粗度なしの平滑面とした。市街地の凹凸による乱流効果は再現していない。

(2) 測定方法

風洞気流は、温度成層装置を稼働せずに戻り気流冷却装置で気流温度を 25°C 一定に保った。基準風速は $X=650 \text{ mm}$ の $Z=600 \text{ mm}$ で 0.5 m/s に設定した。図 14 に接近流の鉛直方向の風速分布と温度分布を示す。床面冷却加熱パネルは 6 枚のパネルの内、風上から 5 枚目の床パネル温度を 15°C に冷却して、他の 5 枚は床パネル温度を 50°C に設定した。放熱量は REBS 社の熱流計 PHF-01 で計測した。熱流計は直径 38.2 mm 、厚さ 3.9 mm で、温度範囲は $-30^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ である。気流温度は銅-コンスタン型熱電対(線径 0.076 mm)で測定した。床面温度は熱電対をパネル表面に貼り付けて測定した。風速はレーザー流速計で測定した。図 15 に熱流量の時間変化を示す。パネル中心で測定した。表 2 の設定値を目標にしたが、パネル温度で電熱量を調整する制御システムなので、とくに冷熱量が約 10%、目標値よりも小さく設定された。今後、発熱量と冷熱量の設定方法を改善する必要がある。

(3) 測定点

図 16 に風速と温度の測定点を示す。温度境界層厚さが約 50 mm 形成されたので、測定点を $Z \leq 50 \text{ mm}$ で選定した。風洞高さ 50 mm は実物高さ 15 m に相当する。座標原点は冷却パネルの風上端部 ($X=5300 \text{ mm}$)とした。延長サポートに取り付けた熱電対を風洞内トラバース装置に装着して測定した。

4.4 実験結果及び考察

(1) 気流特性と温度特性

図 17 に加熱パネルと冷却パネル近傍の風速分布と温度分布の結果を示す。温度差 ΔT は接近流の温度 T_0 と測定温度 T の差で表示した。温度分布から、冷却パネル上に安定成層流が形成されたことが確認された。 $X=900 \text{ mm}$ の $Z \leq 50 \text{ mm}$ でバルクリチャーソン数は $Rb=0.04$ であった。逆に冷却パネルから加熱パネルに移ると安定成層流から不安定成層流になり、 $Rb=-0.10$ に変化した。冷却パネルの安定成層流下でパネル近傍の風速が低下した。冷却パネルから加熱パネルに移る $X > 1200 \text{ mm}$ では、不安定

ルから加熱パネルに移る $X > 1200\text{mm}$ では、不安定成層流に転移するので床面近傍の風速は回復した。 X 方向の乱れの強さは、上流の加熱パネルで生成される乱れか、冷却パネルの冷塊域に妨げられて上空に運はれる結果、風下側の加熱パネルの上空で乱れが増大した[11,12]。図 18(1)の可視化写真から、上空の乱れの増大は加熱パネルで生成され、この乱れか冷塊域に妨げられて上空に運搬されたことが判る。図 18 (2) の煙軌跡は冷却パネルの安定層流内で乱れか少ないことを示す。 Z 方向の乱れの強さは冷却パネル近傍で減少した。図 19 に熱画像を示す。冷却パネルの側壁面から冷気流の温度境界層の形成が観測されるが、図 17 (2) の空気温度分布と比較すると、熱ふく射の影響で温度境界層厚さか大きく形成された。

(2) 放熱量分布と局所対流熱伝達分布

図 20 に熱流計で測定した加熱パネルと冷却パネルからの放熱量分布を示す。冷却パネル上で -50 W/m^2 から -120 W/m^2 の冷熱量が生じた。図 21 に局所対流熱伝達率分布を示す。 $Z=50\text{mm}$ の気温と床面温度の温度差で熱流量を除して局所対流熱伝達率を計算した。境界面での数値の変化か大きい。とくに $X=0$ では床面と上空の温度差か僅差だったので局所対流熱伝達率は約 $300\text{ W/m}^2\text{K}$ の値を示した。冷却パネルの先端を除いて、加熱パネルで $10\sim 15\text{ W/m}^2\text{K}$ 、冷却パネルで $10\sim 25\text{ W/m}^2\text{K}$ の数値を得た。対流熱伝達率は都市表面から上層大気への放熱特性を示す重要な特性値である。都市キャノピー層の対流熱伝達率テータの集積を得ることが都市の温熱環境を解析する上で重要である。

5. おわりに

温度成層風洞の基本性能と夏季晴天時の公園緑地の熱環境シミュレーションについて報告した。研究の初期段階であるので、熱流量の算出方法や熱画像の評価方法等に検討すべき課題が多い。しかし、熱汚染対策として公園緑地の冷却効果か充分期待できることが判った。今後は本装置を活用して都市温熱環境の解析を進める予定である。

謝辞

風洞基本性能の測定に当り、本学卒業研究生に協力を得た。ここに記して謝意を表する。本風洞は平成

9年度の私学学校設立整備費補助金により建設された。熱源システムの改良工事は平成 12 年度の学術フロンティア研究推進事業の一環として行われた。

<主な記号>

Rb ハルクリチャードソン数

q 放熱量 [W/m^2]

U 風速[m/s]

Uo 基準風速[m/s]

$\sqrt{u^2}, \sqrt{v^2}$ X 方向と Z 方向の乱流速度[m/s]

T 温度[$^{\circ}\text{C}$]

ΔT 温度差[$^{\circ}\text{C}$]

α 対流熱伝達率[$\text{W/m}^2\text{K}$]

X.Y.Z 側定胴入口からの座標軸

x. y. z 冷却パネルからの座標軸

参考文献

- 1) 大場, 加藤 室内回流式エッフェル型温度成層風洞の基本性能について (その 1), 日本建築学会大会梗概集, 503-504. 1999
- 2) 栗田, 大場 室内回流式エッフェル型温度成層風洞の基本性能について (その 2), 日本建築学会大会梗概集, 639-640. 2000
- 3) 栗田, 大場, 名和 室内回流式エッフェル型温度成層風洞の基本性能について (その 3), 日本建築学会大会梗概集, 761-762. 2001
- 4) 大場, 栗田, 名和, 室内回流式エッフェル型温度成層風洞の紹介, 日本風工学誌, 88, 73-80. 2001
- 5) I Uno et al An observation study of the structure of the nocturnal urban boundary layer. Boundary Layer Meteorology. 45. 59-82. 1988
- 6) 大屋, 渡辺, 杉谷 大気成層流の風洞シミュレーションとその可視化, 第 14 回風工学シンポジウム, 79-84. 1996
- 7) 持田, 公園緑地からの冷気流の周辺市街地への移流・拡散に関する野外実測と数値解析, 風工学研究センター 2000 年度研究成果報告書, 129-133. 2001
- 8) 大塚, 中村, 風洞実験による建物群模型の対流熱伝達率の特性把握, 日本建築学会計画系論文集, 520. 83-90. 1999

- 9) 前田、石黒、強制対流のある室の熱対流の近似相似則、日本建築学会論文集、66, 73-76, 1960
- 10) 勝田、土屋、市川、正田、集会室内の空気分布に関する実測および模型実験、生産研究、第21巻, 10号, 590-592, 1969
- 11) 村上、大場、地表面温度差の物質拡散に及ぼす影響 都市温熱環境の風洞実験によるシミュレーション、生産研究、29巻、12号、106-111, 1978
- 12) 大場、村上、都市における地表面温度差の物質拡散に及ぼす影響に関する実験的研究、東京工芸大学紀要、5巻、2号、58-67, 1982
- 13) 横尾、小都市における市内外の拡散係数、日本建築学会計画系論文集、501, 85-91, 1997